長野県小渋川流域における西南日本外帯の変成温度構造

森 宏* 友 岡 洋 介*
常 盤 哲 也* 瀬 瀬 佑 衣**

Metamorphic Thermal Structure of the Outer Zone of Southwest Japan in the Koshibu-gawa Section, Nagano Prefecture, Central Japan

Hiroshi MORI*, Yosuke TOMOOKA*,
Tetsuya TOKIWA* and Yui KOUKETSU**

[Received 30 March, 2020; Accepted 3 August, 2020]

Abstract

Raman spectral analyses were conducted of carbonaceous materials (CM) in meta-sedimentary rocks to estimate the metamorphic thermal structure of the Outer Zone of Southwest Japan in the Akaishi Mountains area, central Japan. Twenty samples of pelitic and psammitic rocks were collected along the Koshibu River and by traversing the Sanbagawa, Chichibu, and Shimanto belts. The datasets of the full width at half maximum of the D1-band ($FWHM_{D1}$)—which is a sensitive thermal parameter of the Raman spectra of CM—imply that each rock records a single metamorphic thermal event. The peak metamorphic temperatures estimated with Raman CM geothermometry show 286–339°C in the Sanbagawa Belt, 284–350°C in the Chichibu Belt, and 328–347°C in the Shimanto Belt with a continuous spatial change including at the boundaries between belts. From northwest to southeast, a clear temperature decrease is observed in the Sanbagawa Belt, but an increase in the Chichibu Belt with a constant high- T condition—similar to those recognized in southeast part of the Chichibu Belt—in the Shimanto Belt. A comparison of geological structures suggests that the present thermal structures in the Chichibu and Shimanto belts were formed with the formation of a “twist-bend” structure related to the collision of the Izu-Ogasawara (Izu-Bonin) Arc with respect to the Honshu Arc at middle Miocene. In contrast, the thermal structure in the Sanbagawa Belt was mainly formed before about 20 Ma but the above middle Miocene tectonics may involve the formation of the apparent steep geothermal gradient.

Key words : Raman carbonaceous material geothermometry, Outer Zone of Southwest Japan, metamorphic thermal structure, twist-bend structure, Koshibu-gawa (Koshibu River), Akaishi Mountains

キーワード : 炭質物ラマン温度計, 西南日本外帯, 変成温度構造, ねじ曲がり構造, 小渋川, 赤石山地

* 信州大学学術研究院理学系

** 名古屋大学大学院環境学研究科

* Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

** Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya, 464-8601, Japan

I. はじめに

中期中新世に開始した日本海拡大と伊豆-小笠原弧（伊豆-ボニン弧）の本州弧への衝突開始（Hyodo and Niitsuma, 1986）は、日本列島形成史における第一級のテクトニックイベントであり、現在の日本列島の地質構造の骨格形成に大きく関与している。これらの影響は中部地方において特に顕著であり、日本陸上最大規模の断層である糸魚川-静岡構造線の活動、フォッサマグナの形成、さらには、現在も活発な隆起量を誇る赤石山地の急速上昇などの大規模な地殻変動として捉えられる。中部地方の中期中新世以降のテクトニクスに関しては、地形学、地質学、測地学、古地磁気学、熱年代学等の多方面からのアプローチがなされているが（例えば、貝塚, 1984; 天野・伊藤, 1990; 活断層研究会, 1991; 鷲谷・井上, 2003; Sueoka *et al.*, 2017; 星, 2018）、これらはおもに、地殻浅部もしくは最近の活動を対象としている。

一方、上記中期中新世以降の活動に関連して、西南日本外帯の基盤地質構造も大きく改変されている。西南日本外帯は、中央構造線（MTL）を北限として、北から南に三波川帯、秩父帯、および四万十帯が、関東山地から九州にかけて東西走向で帯状配列するが、赤石山地では、MTLを含め三帯の帯状配列が南北走向に屈曲する（例えば、Kano *et al.*, 1990; 図 1A, B）。また、三帯の大局的な面構造（層理面もしくは片理面）の姿勢が、赤石山地南部では北東-南西走向で北西傾斜が卓越する一方、北部では南北走向で東傾斜を呈することから（例えば、Kano and Matsushima, 1988）、伊豆-小笠原弧の衝突に関連して形成され、南から見て反時計回りの水平回転軸成分を有する、大規模な“ねじ曲がり構造”の存在が推定されている（例えば、松島, 1994, 1997; 狩野, 2002; 図 1C）。このことは、赤石山地の西南日本外帯の基盤岩が一体となって深部から急激に上昇してきたことを示しており、同地域の基盤岩研究は、中期中新世以降のテクトニクスに関する深部活動履歴の究明に重要であるといえる。

変成温度条件は、深部情報を捉える上で基礎的

かつ必要不可欠であるが、赤石山地の西南日本外帯においては、変成鉱物組合せやイライト結晶化度解析等に基づく推定がなされているものの（例えば、Watanabe, 1974, 1977; 山田ほか, 1983; Toriumi and Teruya, 1988; 唐沢・狩野, 1992; Tanabe and Kano, 1996）、三帯を横断した連続的かつ定量的な評価は行われていない。西南日本外帯の三帯は、形成年代もしくは形成深度の異なる地質体であり（例えば、尾崎ほか, 2002）、これら変成温度条件の詳細情報は、中期中新世のテクトニックイベント発生前の三帯の位置関係や接合時期の推定に必要である。また、地質構造との比較より、深部からの上昇過程の詳細を明らかにすることが可能であり、広域地質構造より推定されたねじ曲がり構造の検証にもつながる。

先行研究に基づけば、ねじ曲がり構造の影響は、赤石山地南部から北部にかけて累進的に顕著になっている（図 1C）。ただし、赤石山地北部では、中期中新世以降に貫入した大規模な火成岩類が分布しており（図 1B）、これら熱影響は周囲の基盤岩にも広範囲に及んでいる（例えば、河内ほか, 1983; 牧本ほか, 1996）。そのため、変成温度解析に基づくねじ曲がり構造の検証には、これら火成活動に伴う二次的な熱影響を考慮する必要がある。一方、赤石山地南部では、大規模な貫入岩の分布は認められず（例えば、尾崎ほか, 2002）、深部における温度履歴を保持している可能性が高い。また同地域での解析は、今後、赤石山地北部におけるねじ曲がり構造と貫入の両影響の識別基準にもなり得る。

そこで本研究では、ねじ曲がり構造の南限域を流れる小渋川に沿って（図 1B, C）、炭質物ラマン温度計（Kouketsu *et al.*, 2014）を用いた変成温度解析を、三波川帯、秩父帯、および四万十帯（赤石層群）を横断して行った（図 2）。その結果、赤石山地における西南日本外帯の変成作用およびねじ曲がり構造との関係性を考える上で重要な温度情報を得たので、以下に報告する。

II. 地質概説

MTL と糸魚川-静岡構造線（ISTL）の間に位

図 1 (A) 西南日本外帯の分布図 (常盤ほか, 2018; Wallis *et al.*, 2020 を改変). (B) 赤石山地における三波川帯, 秩父帯, および四万十帯の地質概略図 (尾崎ほか, 2002; 常盤ほか, 2018 を改変). ISTL, 糸魚川-静岡構造線; MTL, 中央構造線; TTL, 戸台構造線; BTL, 仏像構造線. (C) 赤石山地・西南日本外帯におけるねじ曲がり構造の概略図 (松島, 1997 を改変).

Fig. 1 (A) Distribution of Outer Zone of Southwest Japan (modified from Tokiwa *et al.*, 2018; Wallis *et al.*, 2020). (B) Simplified geological map of Sanbagawa, Chichibu, and Shimanto belts in the Akaishi Mountains (modified from Ozaki *et al.*, 2002; Tokiwa *et al.*, 2018). ISTL, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line; MTL, Median Tectonic Line; TTL, Todai Tectonic Line; BTL, Butsuzo Tectonic Line. (C) Schematic figure showing “twist-bend” (“nejimagari” in Japanese) structure of the Outer Zone of Southwest Japan in the Akaishi Mountains area (modified from Matsushima, 1997).

置する赤石山地の西南日本外帯には、西から東にかけて、三波川帯、秩父帯、および四万十帯が北北東-南南西～北東-南西走向で帯状配列している（図1B：図2）。三波川帯は、その西端でMTL

を介して西南日本内帯の領家帯と接し、東端では戸台構造線 (TTL) を介して秩父帯と接する。秩父帯は、東端において仏像構造線 (BTL) を介して四万十帯と接する。四万十帯は、BTL と ISTL

図 2 小渋川流域の地質図 (尾崎ほか, 2002 を改変), および, 本研究における試料採取地点と野外で観察された面構造 (片理面, 劈開面, および層理面) の姿勢. MTL, 中央構造線; TTL, 戸台構造線; BTL, 仏像構造線.

Fig. 2 Geological map of area along the Koshiyama River (modified from Ozaki *et al.*, 2002), showing sampling locations and foliation structure (schistosity, cleavage, and bedding) measured in this field study. MTL, Median Tectonic Line; TTL, Todai Tectonic Line; BTL, Butsuzo Tectonic Line.

の間に位置する。また, 赤石山地の四万十帯は, 構造層序区分に基づき細分され (Kano and Matsushima, 1988), 本調査地域を含む四万十帯西部には BTL に沿って赤石層群が分布する (図 1B)。これら三帯には, ジュラ紀~古第三紀に形成された付加体構成岩もしくはそれらを原岩とする変成岩がおもに分布する (例えば, 渡辺ほか, 1982; 川端, 1984; 柴田・高木, 1988; 村松, 1997; 金本・大塚, 2000b; 尾崎ほか, 2002; 常盤ほか, 2018; 杉本ほか, 2019)。三波川帯の西部は片理の発達した泥質岩および苦鉄質岩がおもに分布し, 東部では玄武岩溶岩などの苦鉄質岩から構成され

る御荷鉾緑色岩類が TTL に沿って分布する (図 2)。秩父帯は泥質混在岩を主体として, チャート, 砂岩泥岩互層, 玄武岩, および石灰岩の岩体を含む。四万十帯の赤石層群は, 砂岩および砂岩泥岩互層を主体として, 玄武岩, チャート, および石灰岩の岩体を含む。

変成作用に関しては, おもに鉱物組み合わせおよびイライト結晶化度に基づく研究がなされている (例えば, 金本・大塚, 2000a; Tanabe and Kano, 1996; Toriumi and Teruya, 1988; Watanabe, 1974; 山田ほか, 1983)。小渋川地域では, 苦鉄質岩, 泥質岩, もしくは砂質岩中の変成鉱物

組み合わせより、三波川帯では青色片岩相、秩父帯ではパンペリー石-アクチノ閃石相、赤石層群を含む四万十帯西部ではプレーナイト-パンペリー石変グレイワック相もしくはパンペリー石-アクチノ閃石相相当の推定がなされている (Watanabe, 1974; 山田ほか, 1983)。また、三波川変成作用の温度圧力条件として 300–350°C, 5–6 kbar が見積もられている (Watanabe, 1977)。

地質構造に関しては、上述の通り赤石山地の広域的な解析がなされているものの、小渋川流域における面構造の姿勢等に関する詳細なデータは乏しい。そこで、本研究の試料採取の際に得られた面構造 (図 2) の特徴を以下に述べる。小渋川流域では、三帯ともに片理面もしくは劈開面からなる面構造の発達が普遍的に認められる (図 2; 図 3A–E)。また、四万十帯では、砂質岩泥質岩互層において層理面も確認される (図 2)。面構造の姿勢としては、三波川帯では南北走向で中角～高角東傾斜、秩父帯では南北～北東-南西走向で低角～中角東傾斜、および四万十帯では北北東-南南西～北東-南西走向で中角～高角東傾斜が卓越する。

III. 分析試料

本研究では、三波川帯、秩父帯、および四万十帯・赤石層群を横断した小渋川流域の MTL から南東に約 15 km までの範囲を対象に、炭質物ラマン分光分析用の試料採取を行った (図 2)。泥質岩もしくは砂質岩露頭から、三波川帯で 5 地点、秩父帯で 9 地点、および四万十帯・赤石層群で 5 地点の合計 20 試料を採取した (表 1)。なお、秩父帯の KO2-8 および KO2-9 試料は、砂質岩泥質岩互層からなる同一露頭の砂質部および泥質部からそれぞれ採取した。分析に用いた泥質岩はおもに石英、斜長石、白雲母や緑泥石を含む粘土鉱物、および炭質物から構成され、石英濃集層と炭質物・粘土鉱物濃集層の互層を伴う面構造 (片理面もしくは劈開面) が発達する (図 3A–C, E)。秩父帯および四万十帯から採取した砂質岩は、石英、長石、炭質物、および火山岩片を多く含み、まれにジルコンなどの重鉱物を含む (図

3D, F)。また、鏡下では、秩父帯の砂質岩では粘土鉱物などの定向配列により面構造が認められるが、四万十帯の砂質岩では認められない (図 3D, F)。

IV. 炭質物ラマン温度計および分析手法

有機物起源の炭質物は、温度上昇に伴い、結晶化 (石墨化) が進行するとともに、ラマンスペクトルも変化する (例えば, Beyssac *et al.*, 2002)。炭質物ラマン温度計は、この被熱に伴う炭質物のラマンスペクトル変化を利用したものであり、また、石墨化が熱的不可逆性を有することから、岩石が被った変成ピーク温度 (最高到達温度) が推定可能である (Beyssac *et al.*, 2002)。

炭質物のラマンスペクトルは、複数のピークバンドから構成され、主要なバンドとしては、約 1580 cm⁻¹ に出現する G-band, 約 1350 cm⁻¹ の D1-band, 約 1620 cm⁻¹ の D2-band, 約 1510 cm⁻¹ の D3-band, 約 1245 cm⁻¹ の D4-band がある (例えば, Kouketsu *et al.*, 2014; 図 4A)。これらバンドの半値幅 (full width at half maximum: FWHM) や面積比等と被熱温度との相関より、これまでに複数の炭質物ラマン温度計が開発されている (例えば, Beyssac *et al.*, 2002; Aoya *et al.*, 2010; Kouketsu *et al.*, 2014)。本研究では、D1-band の半値幅 ($FWHM_{D1}$) を利用した温度計 (Kouketsu *et al.*, 2014) により温度推定を行った。同温度計は、以下の式 (1) に、 $FWHM_{D1}$ を代入することで温度 (T_{D1}) の推定が可能である。

$$T_{D1} (^\circ\text{C}) = -2.15 \times (FWHM_{D1}) + 478 \quad (1)$$

なお、この温度計の適用温度範囲は約 150 ~ 400 °C, 誤差は約 ±30°C である (Kouketsu *et al.*, 2014)。

ラマン分光分析に際しては、1/4 μm のダイヤモンド研磨まで処理した岩石薄片試料を用いて、名古屋大学に設置の Nicolet Almega XR (Thermo Scientific 社製) により測定を行った。同装置の測定では、波長 532 nm の Nd-YAG レーザーを測定対象粒子に焦点を合わせて照射し、散乱した光を 1 mm あたり 2400 本の回折格子を

表 1 ラマン分光分析に使用した試料の位置情報と岩相, および, 各試料の $FWHM_{D1}$ 値と見積もり温度.

Table 1 Locations and lithologies of samples for which Raman spectral analyses were conducted, and $FWHM_{D1}$ and estimated temperatures of the samples.

Sample	Horizontal distance from the surface of the MTL (m)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Rock type	N^*	$FWHM_{D1}$ ($\pm 1\sigma$)**	Temperature (°C)***
Sanbagawa Belt							
KO1-1	900	35.555456	138.043492	Pelitic schist	31	64.8 $\pm$ 6.8	339 $\pm$ 15
KO1-3	1100	35.554356	138.045026	Pelitic schist	38	73.9 $\pm$ 9.2	319 $\pm$ 20
KO1-4	1275	35.553344	138.046174	Pelitic schist	25	89.1 $\pm$ 10.3	286 $\pm$ 22
KO2-1	1650	35.551825	138.048706	Pelitic schist	29	82.4 $\pm$ 5.3	301 $\pm$ 11
KO1-8	1725	35.549538	138.047869	Pelitic schist	27	88.3 $\pm$ 7.6	288 $\pm$ 16
Chichibu Belt							
KO2-6	4425	35.535422	138.073382	Pelitic phyllite	28	87.6 $\pm$ 7.1	290 $\pm$ 15
KO1-10	4550	35.534566	138.074595	Pelitic phyllite	26	85.6 $\pm$ 9.3	294 $\pm$ 20
KO2-8	5225	35.531021	138.080581	Psammitic phyllite	28	75.0 $\pm$ 5.5	317 $\pm$ 12
KO2-9	5225	35.531021	138.080581	Pelitic phyllite	25	75.8 $\pm$ 5.6	315 $\pm$ 12
KO1-11	5450	35.528323	138.080635	Pelitic phyllite	27	86.7 $\pm$ 6.7	292 $\pm$ 14
KO1-12	5625	35.527171	138.081815	Pelitic phyllite	29	90.1 $\pm$ 9.4	284 $\pm$ 20
KO2-12	6550	35.521085	138.088521	Pelitic phyllite	28	73.6 $\pm$ 6.3	320 $\pm$ 13
KO2-16	7925	35.510282	138.095623	Pelitic phyllite	35	71.1 $\pm$ 3.0	325 $\pm$ 6
KO2-17	8300	35.507356	138.097984	Pelitic phyllite	29	59.7 $\pm$ 4.7	350 $\pm$ 10
KO2-19	8675	35.505418	138.101460	Psammitic phyllite	27	66.3 $\pm$ 5.1	336 $\pm$ 11
Shimanto Belt (Akaishi Group)							
KO2-20	8700	35.505339	138.101653	Pelitic phyllite	30	63.1 $\pm$ 3.8	342 $\pm$ 8
KO2-21	8900	35.503697	138.102908	Pelitic phyllite	25	69.9 $\pm$ 8.1	328 $\pm$ 17
SH1	9925	35.494010	138.106449	Psammitic phyllite	29	61.2 $\pm$ 5.6	347 $\pm$ 12
SH2	10825	35.487301	138.112328	Psammitic phyllite	29	64.8 $\pm$ 6.0	339 $\pm$ 13
SH3	12175	35.479369	138.121995	Psammitic phyllite	30	66.7 $\pm$ 7.9	335 $\pm$ 17

* N , number of measurements.

** Errors of $FWHM_{D1}$ (full width at half maximum of D1-band) show standard deviations (1σ).

*** Estimated temperatures and their errors are converted from average $FWHM_{D1}$ and the deviations respectively by using equation (1).

通して電熱クーラー付きの CCD で感知してスペクトルを得る。測定条件としては, Kouketsu *et al.* (2014) に従い, 対物レンズは 100 倍 ($NA = 0.90$), サンプル表面に照射するレーザー出力は約 1 mW, 測定露光時間は 30 秒とした。また薄片作成時の研磨による結晶構造損傷の影響 (Beyssac *et al.*, 2003; Kouketsu *et al.*, 2019) を避けるため, 試料中に埋没している炭質物粒子を測定対象とした。さらに, 試料内における石墨化の不均質性を考慮する必要があるため (Aoya *et al.*, 2010), 各試料につき 25 点以上の分析を行っ

た (表 1)。得られた炭質物のラマンスペクトルについては, Kouketsu *et al.* (2014) の手順に従って, PeakFit 4.12 ver. (SeaSolves Software Inc., MA, USA) を用いてピーク分離を行い, $FWHM_{D1}$ を算出した (図 4B; 表 1)。

V. 結果と考察

1) 炭質物ラマンスペクトルの特徴と変成温度条件

ラマン分光分析により得られた各試料における代表的な炭質物のラマンスペクトルを図 4A に,

図 3 三波川帯 (A, B), 秩父帯 (C, D), および四万十帯 (E, F) から採取した泥質岩および砂質岩の特徴的な薄片顕微鏡写真。(A) 泥質片岩。(B) (A)と同一視点で撮影。(C) 泥質千枚岩。(D) 砂質千枚岩。(E) 泥質千枚岩。(F) 砂質千枚岩。(B)はオープンニコル、その他はクロスニコルで撮影。CM, 炭質物; Qtz, 石英; Pl, 斜長石; Zr, ジルコン; VRF, 火山岩片。

Fig. 3 Representative photomicrographs of pelitic and psammitic rocks collected from Sanbagawa Belt (A, B), Chichibu Belt (C, D), and Shimanto Belt (E, F). (A) Pelitic schist. (B) The same view as (A). (C) Pelitic phyllite. (D) Psammitic phyllite. (E) Pelitic phyllite. (F) Psammitic phyllite. (B) is taken in plane-polarized light and the others in cross-polarized light. CM, carbonaceous material; Qtz, quartz; Pl, plagioclase; Zr, zircon; VRF, volcanic rock fragment.

ピーク分離後の $FWHM_{D1}$ に関する解析結果を表 1 および図 4B に示す。また, $FWHM_{D1}$ 以外のおもな解析値を電子付録 1 に示す。

本研究より得られた炭質物のラマンスペクトルは, MTL 近傍の三波川帯, 秩父帯東部, および四万十帯の試料 (KO1-1, 3, KO2-12, 16, 17, 19-21, SH1-3) において, 1350 cm^{-1} 付近のピークが 1600 cm^{-1} 付近のピークよりも強度が大きい (図 4A)。また, 他の試料では, 上記ピー

ク強度の関係は逆転するが, 1245 cm^{-1} 付近に D4-band が顕著に認められる (図 4A)。さらに, 各測定により得られた $FWHM_{D1}$ 値はいずれも $40 \sim 120\text{ cm}^{-1}$ の範囲に収まる (図 4B)。これらは, Kouketsu *et al.* (2014) で示される 400°C 以下の炭質物ラマンスペクトルの特徴と一致しており, いずれの試料の測定値も半値幅温度計の適用範囲内であることを示す。また, 各試料の $FWHM_{D1}$ のヒストグラムはおおむねユニモーダ

図 4 ラマンスペクトルおよび FWHM_{D1} . (A) 各試料から得られたラマンスペクトル例. 点線は 1350 cm^{-1} および 1600 cm^{-1} のラマンシフト位置を示す. (B) 各試料の FWHM_{D1} 値の頻度分布を示すヒストグラム. 縦軸は全測定数 (N) に対する相対頻度を示す. 太破線は FWHM_{D1} の平均値 (ave.) を示す.

Fig. 4 Raman spectra and FWHM_{D1} . (A) Examples of Raman spectra obtained from all samples. Positions of Raman shifts of 1350 cm^{-1} and 1600 cm^{-1} are shown as dotted lines. (B) Histograms showing frequency distribution of FWHM_{D1} values in all samples. Frequency (vertical axes) is indicated by ratio against total number of measurements (N). Average FWHM_{D1} values (ave.) are indicated by bold broken lines.

図 5 全試料の中央構造線 (MTL) からの距離に対する見積り温度. プロットおよびエラーバーはそれぞれ $FWHM_{D1}$ の平均値および標準偏差 (1σ) を温度換算した値を示す. 横軸の試料位置は, MTL からの水平距離 (表 1) を使用.

Fig. 5 Estimated temperatures of all samples versus distance from Median Tectonic line (MTL). Plots of estimated temperatures and their error bars represent average and standard deviation (1σ) of $FWHM_{D1}$ converted into temperature, respectively. Locations of samples are plotted as horizontal distances from trace of the MTL (Table 1).

ルな形状を示すとともに、ヒストグラムの頻出範囲と平均値もおおむね一致しており (図 4B)、いずれの試料のデータセットも、それぞれ単一の熱イベントを反映していると考えられる。そこで、以下では各試料の $FWHM_{D1}$ 平均値より見積もられた温度推定値を変成ピーク温度として議論する。なお、同一露頭から採取した異なる岩相試料間 (KO2-8 と KO2-9; 図 2) では、スペクトルの特徴や温度推定値において明瞭な差は認められない (図 4; 表 1; 電子付録 1)。このことは、炭質物ラマン温度計を用いた解析において岩相依存性がないことを示す先行研究結果 (Aoya *et al.*, 2010; Mori *et al.*, 2017) と整合的であり、本研究における異なる地点かつ異なる岩相に関する温度比較においても、岩相依存性を考慮する必要がないことを示す。

炭質物ラマン温度計により得られた温度条件は、三波川帯で 286 ~ 339°C, 秩父帯で 284 ~ 350°C, 四万十帯で 328 ~ 347°C を示す (図 5; 表 1)。一方、小渋川流域および周辺における苦鉄質岩の解析では、三波川帯では青色片岩相、秩父帯および四万十帯ではパンペリー石-アクチノ閃石相相当の推定がなされ (Watanabe, 1974,

1977; 山田ほか, 1983), これら各変成相の温度条件は、青色片岩相が約 500°C 以下、パンペリー石-アクチノ閃石相が約 370°C 以下である (例えば、坂野ほか, 2000)。また、三波川帯では変成温度条件として 300-350°C の見積もりがなされており (Watanabe, 1977), いずれも本研究結果と調和的である。

通常、付加体構成岩に記録される変成ピーク温度の獲得時期は、付加作用を伴う深部埋没時である。一方、赤石山地の西南日本外帯では、甲斐駒-鳳凰花崗岩体をはじめとして中新世の年代を示す貫入岩体が認められ (図 1B), これらは周囲の母岩に接触変成作用を与えている (例えば、河内ほか, 1983; 牧本ほか, 1996)。そのため、本研究により得られた温度条件がこれら貫入に伴う二次的な熱影響を記録している可能性がある。ただし、小渋川地域および周辺では、貫入岩体の分布は認められず (例えば、尾崎ほか, 2002), また、接触変成作用の証拠となる変成鉱物も確認されない (図 3)。これら観察事実と、上述の各試料のデータセットが単一の熱イベントを反映したものであることを合わせて考えると、炭質物ラマン温度計により見積もられた変成ピーク温度は、(中新世

より前の) 深部埋没時の温度条件であると推察される。

2) 温度構造および地質構造との関係性

本調査地域の大局的な温度構造は、北西から南東にかけて、三波川帯内では温度低下を呈す一方、秩父帯では上昇に転じ、三波川帯-秩父帯境界域付近を境に傾向が大きく変化する(図5)。そこで以下では、秩父帯~四万十帯と、秩父帯-三波川帯の境界域を含む三波川帯に分けて、それぞれの温度構造について議論する。

2-1) 秩父帯~四万十帯

秩父帯では北西から南東にかけて約70°Cの系統的な温度上昇、および、四万十帯では秩父帯南東部の高温領域と同程度ではほぼ一定の温度構造を示す(図5)。また、秩父帯-四万十帯境界をまたいだ試料間(KO2-19とKO2-20; 図2)で明瞭な温度差は認められない(図5)。一方、秩父帯および四万十帯ともに、境界域を含め面構造の姿勢は連続的な空間変化を示す(図2)。また、両地質体の面構造は、層理面もしくは劈開面であり(図2; 図3C-E)、深部埋没以前に形成されたものと考えられる。これら面構造の特徴、上述の本研究により得られた温度条件が深部埋没時に形成されたこと、さらには、秩父帯と四万十帯の堆積年代(秩父帯: 180 Ma以降; 杉本ほか, 2019, 四万十帯: 125 Ma以降; 常盤ほか, 2018)を考慮すると、温度構造の連続的な空間変化は、後期白亜紀以降に秩父帯-四万十帯境界が形成された後、両地質体は同時期に変成ピーク温度を経験し、さらにその後、同一の変形作用を被ったことにより温度構造が曲げられたと解釈可能である。また、北西から南東にかけての温度上昇は、調査地域東部の四万十帯側ほどより深部にあった岩体が地表に露出していると解釈できる。これらの解釈は、広域地質構造解析に基づく、小渋川流域以北の西南日本外帯の地質体が中期中新世以降に深部から一体となって四万十帯側ほど大きく上昇した、とするねじ曲がり構造の考え(例えば、松島, 1997; 図1C)とも整合的である。この整合性は、赤石山地の広域的なねじ曲がり構造に起因して秩父帯から四万十帯にかけての系統的な温度上昇構

造が形成されたことを示す。

また、秩父帯北西部では、面構造および温度構造の局所的な変化が認められる(図2; 図5)。同地域は、系統的な温度上昇構造の西端に一致しており(図5)、変形の集中が想定されるねじ曲がり構造の軸部であると推察される。

2-2) 三波川帯および三波川帯-秩父帯境界

三波川帯では、北西から南東にかけて約50°Cの急激な温度低下を示す(図5)。一方、面構造(片理面)の姿勢は、おおむね南北走向で中角~高角東傾斜を呈し、温度構造と同様に連続的な空間変化が認められる(図2)。また、三波川帯で発達する片理面の形成時期に関しては、三波川帯上昇初期の後期白亜紀であることが示されている(例えば、Wallis, 1998; 青矢・遠藤, 2017)。ここで、三波川帯岩石の変成ピーク温度の獲得時期が深部埋没時であったと仮定すると、後期白亜紀の上昇に伴う変形作用により温度構造が曲げられるとともに、その上昇量が北西側ほど大きかったことにより、現在の温度構造が形成されたと解釈できる。

また、三波川帯-秩父帯境界域では、境界をまたいだ試料間(KO1-8とKO2-6; 図2)で明瞭な温度差は認められない(図5)。同境界域では、御荷鉾緑色岩類が厚く挟まれており、温度データの空白域が存在するが、面構造の姿勢に関しても明瞭な不連続性は認められない(図2)。また、小渋川地域の御荷鉾緑色岩類および三波川帯境界付近の秩父帯では、泥質岩を主体とする三波川帯北西部と同様に、青色片岩相当の変成条件が推定され、三波川帯沈み込み時(埋没時)の変成作用(三波川変成作用)の影響が、秩父帯まで及んでいたとの指摘もある(例えば、Watanabe, 1974, 1977)。これら本研究および先行研究結果より、三波川帯の埋没~上昇初期にかけて、御荷鉾緑色岩類を含む三波川帯と秩父帯は既に近接していたと考えられる。

一方、紀伊半島の三波川帯では、本研究と同様に炭質物ラマン温度計を用いてMTLに近づくにつれての温度上昇が検出されているが、この温度構造形成の要因として、MTLの断層運動により

発生した剪断熱の二次的な熱影響によるものと解釈されている (Mori *et al.*, 2015)。そのため、本研究地域における三波川帯-秩父帯境界域を含む三波川帯の温度構造の形成要因としても、剪断熱の可能性は考えられるが、MTL 近傍のデータが不足しているため、現段階でのこれ以上の検証は困難である。ただし、紀伊半島における剪断熱の発生時期は約 20 Ma 以前とされており (Mori *et al.*, 2015)、上記いずれの熱源解釈 (剪断熱 vs. 埋没時の変成作用) においても、中期中新世のテクトニクスは、三波川帯で認められた温度構造の主要因でないと推察される。その一方で、小渋川地域の三波川帯および三波川帯-秩父帯境界域の面構造は高角～中角東傾斜が卓越し (図 2)、西傾斜が卓越する小渋川より南の地域 (例えば、松島, 1997) とは姿勢が異なっている。この広域的な姿勢変化の特徴は、ねじ曲がり構造と整合的である (図 1C)。また、三波川帯の温度構造について、MTL からの水平距離を基準として地温勾配を求めると、約 60°C/km の高い値を示す。このことは、三波川帯で認められる温度構造の大局的な特徴 (北西から南東にかけての温度低下) は、中期中新世までに既に形成されていたものの、ねじ曲がり構造形成に伴う短縮作用により、見かけ上、高い地温勾配を呈すに至った可能性がある。

以上の通り、小渋川流域の三帯は、いずれもねじ曲がり構造の影響を被ったと考えられ、中期中新世以降の伊豆-小笠原弧の衝突に伴う赤石山地の広域的な地質構造改変により、西南日本外帯の変成温度構造も大きく改変したことが示唆される。

VI. ま と め

伊豆-小笠原弧の本州弧への衝突に伴い形成されたねじ曲がり構造の南限域にあたる赤石山地の小渋川流域において、炭質物ラムン温度計を用いた三波川帯、秩父帯、および四万十帯を横断した連続的な変成温度解析を行った。各試料で見積もられた温度条件は、いずれも単一の熱イベントを反映した変成ピーク温度を示す。大局的な温度構造は、北西から南東にかけて、三波川帯では急激に温度が低下する一方、秩父帯では系統的な上昇

を示し、また、四万十帯では秩父帯南東部の高温条件と同程度で一定の温度構造を呈す。また、各地質帯境界付近において、温度構造の不連続性は認められない。秩父帯から四万十帯にかけての温度構造は、ねじ曲がり構造に起因する一方、三波川帯に関しては、中期中新世より前の上昇期もしくは中央構造線の剪断熱が主要因であると考えられる。ただし、三波川帯もねじ曲がり構造の影響を被った可能性が高く、中期中新世以降の伊豆-小笠原弧の衝突に起因して、西南日本外帯の変成温度構造も大きく改変したことが示唆される。

謝 辞

本研究は、平成 29 年度一般財団法人長野県科学振興会助成金を受け実施したものである。国立公園特別保護地区および特別地域での土石の採取については環境省の許可 (環境地国許第 0708033 号, 1708034 号) を得て行った。また、国有林での調査については南信森林管理署、村有林での調査については大鹿村、社有林での調査については特種東海製紙株式会社の許可を得て行った。これらの許可申請については、信州大学の唐澤眞季子氏に御尽力いただいた。野外調査に際しては、東京大学の山岡 健氏、島根大学の吉田 宏氏、および信州大学の中野颯斗氏と市谷和也氏に御同行頂いた。本稿は、査読を担当された吉田健太氏、山口飛鳥氏、および編集委員の有益なコメントにより、大幅に改善された。以上の方々に深くお礼申し上げます。

文 献

- 天野一男・伊藤健二 (1990): 南部フォッサマグナの形成: 堆積物からみた島弧の衝突付加テクトニクス. 地質学論集, **34**, 45-56. [Amano, K. and Ito, K. (1990): Construction of the South Fossa Magna: Collision and accretion tectonics of arcs deduced from the sedimentary sequences. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **34**, 45-56. (in Japanese with English abstract)]
- 青矢陸月・遠藤俊祐 (2017): 初期三波川変成作用の認識、及び後期白亜紀三波川沈み込み帯の描像. 地質学雑誌, **123**, 677-698. [Aoya, M. and Endo, S. (2017): Recognition of the 'early' Sambagawa metamorphism and a schematic cross-section of the Late Cretaceous Sambagawa subduction zone. *Journal of the Geological Society of Japan*, **123**, 677-698. (in Japanese with English abstract)]
- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D. and Wallis S.R. (2010):

- Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, **28**, 895-914.
- 坂野昇平・鳥海光弘・小畑正明・西山忠男 (2000): 岩石形成のダイナミクス. 東京大学出版会. [Banno, S., Toriumi, M., Obata, M. and Nishiyama, T. (2000): *Dynamics of Petrogenesis*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- Beyssac, O., Brunet, F., Petit, J., Goffé, B., Chopin, C. and Rouzaud, J.N. (2002): Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, **20**, 858-871.
- Beyssac, O., Goffé, B., Petit, J. P., Froigneux, E., Moreau, M. and Rouzaud, J.N. (2003): On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **59**, 2267-2276.
- 星 博幸 (2018): 関東対曲構造の形成はいつ始まったか?. 地質学雑誌, **124**, 805-817. [Hoshi, H. (2018): Kanto Syntaxis: When did it begin to grow?. *Journal of the Geological Society of Japan*, **124**, 805-817. (in Japanese with English abstract)]
- Hyodo, H. and Niitsuma, N. (1986): Tectonic rotation of the Kanto Mountains, related with opening of the Japan Sea and collision of the Tanzawa block since middle Miocene. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, **38**, 335-348.
- 貝塚爽平 (1984): 南部フォッサマグナに関連する地形とその成立過程. 第四紀研究, **23**, 55-70. [Kai-zuka, S. (1984): Landforms in and around the south Fossa Magna and their tectonic processes of growth. *Quaternary Research*, **23**, 55-70. (in Japanese with English abstract)]
- 金本高明・大塚 勉 (2000a): イライト結晶度からみた長野県諏訪湖南方における三波川帯・秩父帯・四万十帯の弱変成作用. 信州大学理学部紀要, **35**, 11-29. [Kanemoto, T. and Otsuka, T. (2000a): Illite crystallinity and Low-grade metamorphism of the Sanbagawa, Chichibu and Shimanto Belts in the south area of Lake Suwa, central Japan. *Journal of the Faculty of Science, Shinshu University*, **35**, 11-29. (in Japanese with English abstract)]
- 金本高明・大塚 勉 (2000b): 赤石山地北部の秩父帯から産出したジュラ紀中世放射状化石群集. 信州大学理学部紀要, **35**, 69-78. [Kanemoto, T. and Otsuka, T. (2000b): Middle Jurassic radiolarian fossils from the Chichibu Belt in the northern Akaishi Mountains, Nagano Prefecture, central Japan. *Journal of the Faculty of Science, Shinshu University*, **35**, 69-78. (in Japanese with English abstract)]
- 狩野謙一 (2002): 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧の地殻構造変化. 東京大学地震研究所彙報, **77**, 231-248. [Kano, K. (2002): Re-arrangement of the shallow-level structure of Southwest Japan Arc due to the collision of the Izu-Bonin Arc. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **77**, 231-248. (in Japanese with English abstract)]
- Kano, K. and Matsushima, N. (1988): The Shimanto Belt in the Akaishi Mountains, eastern part of the southwest Japan. *Modern Geology*, **12**, 97-126.
- Kano, K., Kosaka, K., Murata, A. and Yanai, S. (1990): Intra-arc deformations with vertical rotation axes: The case of the pre-Middle Miocene terranes of Southwest Japan. *Tectonophysics*, **176**, 333-354.
- 唐沢 譲・狩野謙一 (1992): 赤石山地東部の四万十帯, 瀬戸川層群中のスレート帯の形成とその変形過程. 地質学雑誌, **98**, 761-777. [Karasawa, Y. and Kano, K. (1992): Formation and deformation process of the slate belt in the Setogawa Group (the Shimanto Belt) of the eastern Akaishi Mountains, easternmost Southwest Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **98**, 761-777. (in Japanese with English abstract)]
- 活断層研究会編 (1991): 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会. [Research Group for Active Faults of Japan ed. (1991): *Active Faults in Japan: Sheet Maps and Inventories (Revised Edition)*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- 川端清司 (1984): 赤石山地・遠山川地域の四万十帯より算出した白亜紀放射状化石とその意義. 地球科学, **38**, 215-219. [Kawabata, K. (1984): Cretaceous radiolarian fossils occurred from the Shimanto Belt in the Toyama-gawa Area, Akaishi Mountains, Central Japan, and its geological significance. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, **38**, 215-219. (in Japanese)]
- 河内洋佑・湯浅真人・片田正人 (1983): 市野瀬地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅). 地質調査所. [Kawachi, Y., Yuasa, M. and Katada, M. (1983): *Geology of the Ichinose District. Quadrangle Series, scale 1:50,000*. Geological Survey of Japan. (in Japanese with English Abstract)]
- Kouketsu, Y., Mizukami, T., Mori, H., Endo, S., Aoya, M., Hara, H., Nakamura, D. and Wallis, S.R. (2014): A new approach to develop the Raman carbonaceous material geothermometer for low-grade metamorphism using peak width. *Island Arc*, **23**, 33-50.
- Kouketsu, Y., Miyake, A., Igami, Y., Taguchi, T., Kagi, H. and Enami, M. (2019): Drastic effect of shearing on graphite microtexture: attention and application to Earth science. *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**, 23.
- 牧本 博・高木秀雄・宮地良典・中野 俊・加藤碩一・吉岡 敏 (1996): 高遠地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅). 地質調査所. [Makimoto, H., Takagi, H., Miyachi, Y., Nakano, S., Kato, H. and Yoshioka, T. (1996): *Geology of the Takato District. Quadrangle Series, Scale 1:50,000*. Geological Survey of Japan. (in Japanese with English Abstr-

- ract)]
- 松島信幸 (1994): 赤石山地の中央構造線に対する新しい見方. 飯田市美術博物館研究紀要, **4**, 113-124. [Matsushima, N. (1994): New interpretation of Median tectonic line of the Akaishi mountain lands, in Japan. *Bulletin of the Iida City Museum*, **4**, 113-124. (in Japanese)]
- 松島信幸 (1997): 赤石山地形成論—ポスト和田変動と中央構造線のまくれ上がりについて—. 飯田市美術博物館研究紀要, **7**, 145-162. [Matsushima, N. (1997): Formation of the Akaishi Mountains, central Japan—Post Wada tectonic movements and the rolling up structures near the Median Tectonic Line—. *Bulletin of the Iida City Museum*, **7**, 145-162. (in Japanese)]
- Mori, H., Wallis, S., Fujimoto, K. and Shigematsu, N. (2015): Recognition of shear heating on a long-lived major fault using Raman carbonaceous material thermometry: implications for strength and displacement history of the MTL, SW Japan. *Island Arc*, **24**, 425-446.
- Mori, H., Mori, N., Wallis, S., Westaway, R. and Annen, C. (2017): The importance of heating duration for Raman CM thermometry: evidence from contact metamorphism around the Great Whin Sill intrusion, UK. *Journal of Metamorphic Geology*, **35**, 165-180.
- 村松 武 (1997): 赤石山地中部, しらびそ峠-大沢岳ルートから産出した放散虫化石—微化石データベース構築にむけて III—. 飯田市美術博物館研究報告, **7**, 137-144. [Muramatsu, T. (1997): Radiolarians from the Shirabiso-Oosawadake route in the middle Akaishi Mountains, central Japan: For the construction of the Microfossil Database (part 3). *Bulletin of the Iida City Museum*, **7**, 137-144. (in Japanese)]
- 尾崎正紀・牧本 博・杉山雄一・三村弘二・酒井 彰・久保和也・加藤碩一・駒澤正夫・広島俊男・須藤定久 (2002): 20 万分の 1 地質図幅「甲府」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. [Ozaki, M., Maki-moto, H., Sugiyama, Y., Mimura, K., Sakai, A., Kubo, K., Kato, H., Komazawa, M., Hiroshima, T. and Sudo, S. (2002): *Geological Map of Japan 1:200,000, Kofu*. Geological Survey of Japan, AIST. (in Japanese with English abstract)]
- 鷲谷 威・井上政明 (2003): 測地測量データで見る中部日本の地殻変動. 月刊地球, **25**, 918-928. [Sagiya, T. and Inoue, M. (2003): Crustal movements in the central Japan based on geodetic observation. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **25**, 918-928. (in Japanese)]
- 柴田 賢・高木秀雄 (1988): 中央構造線沿いの岩石および断層内物質の同位体年代—長野県分杭峠地域の例—. 地質学雑誌, **94**, 35-50. [Shibata, K. and Takagi, H. (1988): Isotopic ages of rocks and intra-fault materials along the Median Tectonic Line—An example in the Bungui-toge area, Nagano Prefecture—. *Journal of the Geological Society of Japan*, **94**, 35-50. (in Japanese with English abstract)]
- Sueoka, S., Ikeda, Y., Kano, K., Tsutsumi, H., Tagami, T., Kohn, B.P., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Shibata, K. (2017): Uplift and denudation history of the Akaishi Range, a thrust block formed by arc-arc collision in central Japan: Insights from low-temperature thermochronometry and thermokinematic modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122**, 6787-6810.
- 杉本大志・常盤哲也・志村侑亮 (2019): 赤石山地中央部に分布する秩父帯付加体の碎屑性ジルコン U-Pb 年代. 地質学雑誌, **125**, 827-832. [Sugimoto, T., Tokiwa, T. and Shimura, Y. (2019): Detrital zircon U-Pb ages of the accretionary complex in the Chichibu Belt in the central part of the Akaishi Mountains, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **125**, 827-832. (in Japanese with English abstract)]
- Tanabe, H. and Kano, K. (1996): Illite crystallinity study of the Cretaceous Shimanto Belt in the Akaishi Mountains, eastern Southwest Japan. *Island Arc*, **5**, 56-68.
- 常盤哲也・市谷和也・志村侑亮・竹内 誠・山本鋼志 (2018): 赤石山地四万十帯白亜系赤石層群から得られた碎屑性ジルコン U-Pb 年代. 地質学雑誌, **124**, 539-544. [Tokiwa, T., Ichitani, K., Shimura, Y., Takeuchi, M. and Yamamoto, K. (2018): Detrital zircon U-Pb ages of the Cretaceous Akaishi Group in the Shimanto Belt, Akaishi Mountains. *Journal of the Geological Society of Japan*, **124**, 539-544. (in Japanese with English abstract)]
- Toriumi, M. and Teruya, J. (1988): Tectono-metamorphism of the Shimanto Belt. *Modern Geology*, **12**, 303-324.
- Wallis, S. (1998): Exhuming the Sanbagawa metamorphic belt: the importance of tectonic discontinuities. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 83-95.
- Wallis, S.R., Yamaoka, K., Mori, H., Ishiwatari, A., Miyazaki, K. and Ueda, H. (2020): The basement geology of Japan from A to Z. *Island Arc*, **29**, e12339, doi:10.1111/iar.12339.
- Watanabe, T. (1974): Metamorphic zoning of the Sambagawa and Chichibu Belts in the Koshibugawa river area, Oshika district, central Japan, with special reference to pumpellyite-actinolite schist facies mineral assemblage. *Journal of the Geological Society of Japan*, **80**, 525-538.
- Watanabe, T. (1977): Metamorphism of the Sambagawa and Chichibu Belts in the Oshika District, Nagano Prefecture, Central Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 4, Geology and Mineralogy*, **17**, 629-694.
- 渡辺暉夫・湯浅真人・後藤準次 (1982): 長野県伊那地方の御荷鉾緑色岩類中に産する雲母片岩の K-Ar 年令. 島根大学地質学研究報告, **1**, 63-66. [Watanabe, T., Yuasa, M. and Goto, H. (1982): K-Ar age of

mica schist in the Mikabu Greenstones, Ina district, Nagano prefecture, central Japan. *Geological Reports of Shimane University*, **1**, 63–66. (in Japanese with English abstract)]

山田哲雄・渡辺暉夫・河内洋佑・湯浅真人・関根倫雄・松浦 要・小川邦夫・横田勇治・菅家延征・木下房男・出町 恵 (1983): 赤石山地北部の四万十帯. 地

球科学, **37**, 329–348. [Yamada, T., Watanabe, T., Kawachi, Y., Yuasa, M., Sekine, M., Matsu'ura, K., Ogawa, K., Yokota, Y., Kwanke, E., Kinoshita, F. and Demachi, M. (1983): Geology of the Shimanto Belt of the northern Akaishi Mountains, central Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **37**, 329–348. (in Japanese with English abstract)]